

文章编号: 0253-2239(2004)08-1057-5

# 半导体材料的激光辐照效应计算和损伤阈值分析

段晓峰<sup>1</sup> 牛燕雄<sup>1,2</sup> 张 维<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003  
<sup>2</sup> 天津大学激光与光电子研究所, 教育部光电信息技术科学开放实验室, 天津 300072)

**摘要:** 在激光对抗中, 探测器容易受到激光损伤, 为此研究了连续强激光对半导体材料的损伤机理, 建立了氧碘化学激光器辐照 InSb 圆板型靶材的二维物理模型。在圆柱坐标系中利用积分变换法, 求解热传导和热弹性力学方程组, 得到由激光辐照引起的温度场和热应力场的瞬态分布。经过严格的理论分析, 计算出 InSb 材料的激光破坏阈值, 讨论了不同的辐照时间和光斑半径对破坏阈值的影响。研究发现其破坏形态为熔融破坏, 一般不会出现解理或炸裂现象, 这一结果与相关实验报道一致。最后分析了与温度有关的非线性参量对损伤阈值的影响。

**关键词:** 激光物理; 激光辐照效应; 温度场; 应力场; 损伤阈值; 非线性效应

中图分类号: O437 文献标识码: A

## Calculation of Laser Irradiation Effect and Analysis of Laser-Induced Damage Threshold in Semiconductor

Duan Xiaofeng<sup>1</sup> Niu Yanxiong<sup>1,2</sup> Zhang Chu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Optics & Electronic Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003  
<sup>2</sup> Institute of Laser and Optoelectronics, Optoelectronic Information Science and Technology Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 10 June 2003; revised 9 October 2003)

**Abstract:** Detectors are easy to be damaged by laser irradiation during optoelectronic countermeasures. Damage mechanism of semiconductor induced by high-power continuous-wave laser is investigated. The two-dimensional physical model that chemical oxygen-iodine laser (COIL) irradiates a disk target of InSb is established. The equations of heat conduction and thermoelastic dynamics are solved through integral-transform method in circular cylindrical coordinates. Transient distribution of temperature field and thermal stress field is described. The damage threshold of InSb is calculated, which is related to irradiation time and beam radius. The damage morphology of InSb is proved to be ablation, but no cleavage burst appears. It is in accordance with practice. The influence of temperature-related nonlinear parameter on damage threshold is analyzed.

**Key words:** laser physics; laser irradiation effect; temperature field; thermal stress field; damage threshold; nonlinear effect

## 1 引 言

光电探测器广泛应用于激光雷达、激光测距、光电对抗以及光通信等领域。随着光电对抗技术的发展, 其越来越容易受到激光武器的损伤。激光辐照

效应和破坏阈值分析是该领域的重要研究方向之一。光电探测器一般为半导体材料, 受到激光照射会造成其温度场的变化, 进而使材料的热应力场分布发生变化。不管是温度还是热应力只要达到阈值就会造成不可逆的热损伤包括解理、熔融和汽化等<sup>[1,2]</sup>。

国内外已经开展了不少有关激光损伤效应的实验性<sup>[3~5]</sup>和理论性<sup>[6~8]</sup>工作, 但在理论研究方面, 没有

E-mail: duanxiaofeng@xinhuanet.com

收稿日期: 2003-06-10; 收到修改稿日期: 2003-10-09

注意到与光斑半径有关的二维损伤模型,没有注意到随温度变化的非线性参量对损伤阈值的影响。本文建立了氧碘化学激光器(COIL)辐照 InSb 圆板型靶材的物理模型,并对以上问题进行了详细讨论。InSb 是一种典型的光电探测器材料。氧碘化学激光波长为  $1.315 \mu\text{m}$ , 它的输出功率大,是新型的高功率中红外连续激光器,其理论功率输出可达兆瓦级,在激光对抗和工业加工中有着重要作用,针对这种激光对光学材料的损伤研究具有非常重要的意义。

## 2 理论模型

研究材料的温度和热应力响应,通常采用热传导和热应力学理论。圆板型 InSb 靶材的厚度  $h$  远小于直径,在连续激光作用下厚度方向的温度很快趋于均匀,所以系统采用二维平面模型。半径为  $a$  的圆形激光光斑均匀照射在半径为  $b$  的靶材中央,由于整个系统轴向对称,选用柱坐标系。

### 2.1 温度场解析计算

求解区域为  $0 \leq r \leq b$  的非稳态热传导问题,采用柱坐标导热方程<sup>[9,10]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{g(r,t)}{K} = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t}, \\ g(r,t) = \frac{(1-R) \cdot I(r,t)}{h}, \end{cases} \quad (1)$$

系统满足第一类边界条件,且与外界绝热

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=b} = 0, \quad (2)$$

设  $t=0$  为激光开始作用的时刻,  $T_0 = T(r,0)$  是给定的初始温度分布。温度为标量,可以约定初始条件

$$T_0 = T(r,0) = 0, \quad (3)$$

则(1)式计算的是物体的温升  $\Delta T = T - T_0$ ,所以在  $T_0 = 0$  时,  $T$  为温升。式中  $D = K/(\rho C)$  为热传导系数;  $K, \rho$  和  $C$  分别为热扩散系数、材料的密度和比热容;  $g(r,t)$  为热流体密度,  $h$  为平板靶材的厚度,  $R$  为材料的反射率。  $I(r,t)$  为激光照射的光斑功率密度,这里讨论连续激光辐照,且光斑均匀分布,所以

$$I(r) = \begin{cases} I_0, & r \leq a \\ 0, & r > a \end{cases} \quad (4)$$

导热方程可利用有限元法得到数值解<sup>[11]</sup>,也可以利用傅里叶定律通过模型简化得到数值解<sup>[7]</sup>。本文在柱坐标系下对该问题进行讨论,并利用积分变换公式求解解析解。积分变换式和逆变换式分别为

$$\bar{T}(\beta_m, t) = \int_0^b r' R_0(\beta_m, r') T(r', t) dr', \quad (5)$$

$$T(r, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R_0(\beta_m, r)}{N(\beta_m)} \bar{T}(\beta_m, t), \quad (6)$$

在绝热边界条件的情况下,上式中各项分别表示为特征函数

$$R_0 = \begin{cases} J_0(\beta_m r) & m \neq 0 \\ 1, & m = 0 \end{cases},$$

和特征值

$$\beta_m = \begin{cases} J_1(\beta_m b) & m \neq 0 \\ 1, & m = 0 \end{cases},$$

其中  $\beta_m b$  为第一类一阶贝塞尔函数的根;范数  $N(\beta_m)$  的倒数

$$\frac{1}{N(\beta_m)} = \begin{cases} 2/b^2 J_0^2(\beta_m b), & m \neq 0 \\ 2/b^2, & m = 0 \end{cases}$$

对(1)式进行积分变换,在靶材为有限圆板,即  $r \in [0, b]$  时,得到温度场的解析表达式

$$T(r, t) = \frac{\eta I_0}{Kh b^2} \left\{ a^2 Dt + 2a \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{J_0(\beta_m r) J_1(\beta_m a)}{\beta_m^2 [J_0(\beta_m b)]^2} [1 - \exp(-\beta_m^2 Dt)] \right] \right\}. \quad (7)$$

### 2.2 热应力场分布

对于圆形薄板靶材,温度场轴对称分布,靶半径远大于厚度,其温度变化产生的热应力属于平面应力问题。根据应力的平衡方程、应力-应变的几何方程及应力-应变的广义胡克方程,可解出随温度场变化的环向热应力场的表达式<sup>[10]</sup>

$$\sigma_{\theta}(r, t) = \alpha E \left[ \frac{1}{b^2} \int_0^b T(r, t) r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r, t) r dr - T(r, t) \right], \quad (8)$$

其中  $\alpha, E$  分别为靶材的线性热膨胀系数和杨氏模量,将(5)式代入(6)式得

$$\sigma_{\theta}(r, t) = \frac{2\alpha E \eta I_0}{Kh b^2} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{J_1(\beta_m r)}{\beta_m r} - J_0(\beta_m r) \right] \frac{J_1(\beta_m a)}{\beta_m^2 [J_0(\beta_m b)]^2} [1 - \exp(-\beta_m^2 Dt)] \right\}. \quad (9)$$

### 3 计算结果和讨论

#### 3.1 温升与热应力场分析

根据以上分析,对氧碘激光器( $\lambda=1.315\ \mu\text{m}$ )辐照 InSb 材料进行研究。设激光功率密度为  $I_0=1500\ \text{W}/\text{cm}^2$ , InSb 的材料参量如表 1 所示<sup>[7,12]</sup>。

Table 1 The physical parameters of InSb

Density $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	5.78
Heat conduction $K / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.18
Heat capacity $C / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.18
Coefficient of expansion $\alpha / \text{K}^{-1}$	$5.04 \times 10^{-6}$
Elasticity coefficient $E / \text{Pa}$	$4.12 \times 10^{10}$
Melting point $T_{\text{melt}} / \text{K}$	798
Tensile strength $\sigma_{\text{th}} / \text{Pa}$	$1 \times 10^8$

InSb 材料的几何尺寸为:半径  $r=1.4\ \text{cm}$ ,厚度为  $h=0.2\ \text{cm}$ ,表面反射系数取  $R=0.375$ ,均匀光斑的半径取  $a=0.5\ \text{cm}$ 。

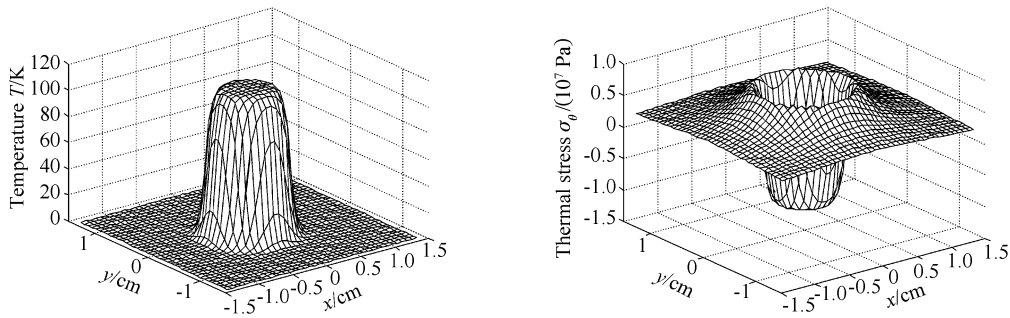


Fig. 1 (a) Temperature rise distribution in InSb induced by uniform intensity laser beam of 0.0245 s, (b) Thermal stress distribution in InSb induced by uniform intensity laser beam of 0.0245 s

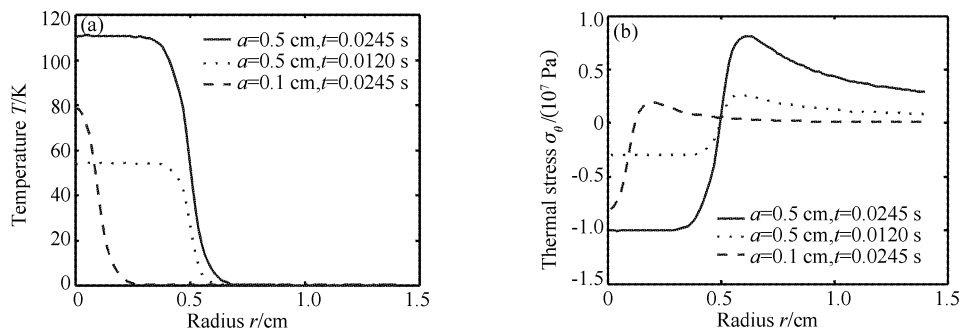


Fig. 2 (a) Temperature rise distribution in InSb induced by laser beam with different radius and time, (b) Thermal stress distribution in InSb induced by laser beam with different radius and time

#### 3.2 激光辐照损伤阈值分析

激光辐照损伤,主要是由于激光照射而导致材料的温度超过熔点  $T_{\text{melt}}$ ,或是材料的热应力大于抗拉强度  $\sigma_{\text{th}}$ 。根据前面的分析,温升最大值出现在光斑中心( $r=0$ ),热应力最大值在  $r=a+\delta$  处,若已知  $T_{\text{melt}}$  和  $\sigma_{\text{th}}$ ,就可以求出熔融损伤功率密度阈值和应力损伤功率密度阈值

$$I_{\text{th}}(t) = \frac{T_{\text{melt}} K h b^2}{\eta} \left\{ a^2 D t + 2a \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{J_1(\beta_m a)}{\beta_m^2 [J_0(\beta_m b)]^2} [1 - \exp(-\beta_m^2 D t)] \right\} \right\}^{-1}, \quad (10)$$

$$I_{th}(t) = \frac{\sigma_{th} K h b^2}{2 \alpha \alpha E \eta} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{J_1[\beta_m(a+\delta)]}{\beta_m(a+\delta)} - J_0[\beta_m(a+\delta)] \right\} \frac{J_1(\beta_m a)}{\beta_m^3 [J_0(\beta_m b)]^2} [1 - \exp(-\beta_m^2 D t)]^{-1}, \quad (11)$$

由图3可知,熔融损伤阈值和应力损伤阈值在激光辐照时间较短时,由于材料表面沉积的能量少,两种阈值功率都比较高,但随着照射时间的增加迅速下降,而后逐渐趋于平缓。图中InSb材料的熔融损伤阈值低于应力损伤阈值,容易发生熔融损伤,这是由于它的熔点较低所决定的。美国海军研究实验室对InSb的损伤阈值定义为表面出现可见损伤时的能量密度,这种损伤就是指熔融破坏。

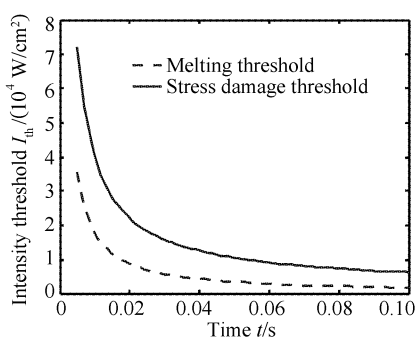


Fig. 3 Damage threshold with deferent irradiation time

图4反映了光斑大小对阈值的影响,研究发现光斑大小对熔融损伤阈值影响不大,但光斑较小时的应力损伤阈值非常高。这是由于温升随光斑半径的增大迅速饱和,而热应力基本上成线性增加。这一结论符合文献[1]中的实验结果。又由于InSb材料的熔点低,所以熔融损伤随光斑半径增大迅速达到饱和,且远低于应力损伤阈值。

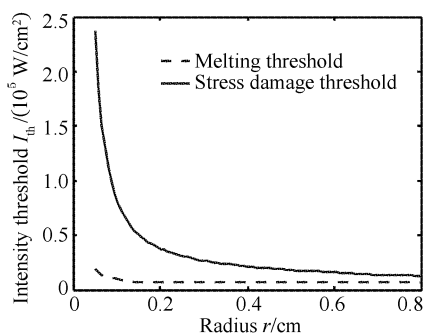


Fig. 4 Damage threshold with deferent beam radius

经过严格的理论分析得到InSb材料的激光破坏阈值,并发现其破坏为熔融破坏。破坏首先出现熔融烧蚀,进而出现熔融烧孔。破坏后,材料的物性参量将发生变化,所以一般情况下InSb不会出现解理或炸裂现象。

### 3.3 非线性效应对损伤阈值的影响

由于激光辐照,材料的温度变化范围很宽。热

容等参量随温度变化,由此表现出来的非线性效应应该加以考虑。

InSb的热扩散系数  $K=0.18\Gamma^{-0.83} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ , 热容  $C=0.18+0.03\Gamma \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ , 式中  $\Gamma=T/T_0$ , 参量取自文献[12]。工作在室温时,  $T_0=300 \text{ K}$ , 沿用前面给出的材料参量。如图5,可以得到在考虑了非线性效应时的激光损伤阈值(实线),并与图3中熔融阈值曲线(虚线)相对比。随着温度的升高材料的热容增大,使材料达到熔点需要更多的热量,因此导致损伤的激光功率密度升高。

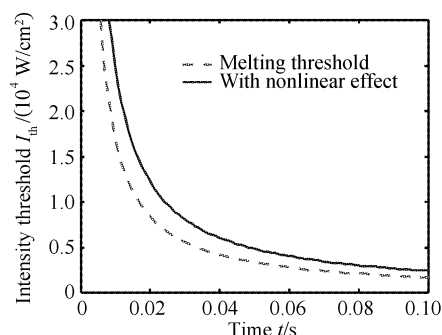


Fig. 5 Damage threshold with nonlinear effect

如果不考虑非线性效应,则相对误差在30%~33%之间,随着时间的增加而降低。因此在进行激光辐照效应计算和损伤阈值分析时,半导体材料的非线性效应应该加以考虑。定量给出的损伤阈值功率与文献[13]给出的实验测量结果一致,说明该模型的合理性。

### 3.4 模型的补充说明

本文建立了氧碘连续激光器(COIL)辐照InSb圆板型靶材的物理模型。此模型适用于连续激光和单个长脉冲激光。其它情况下,光斑处激光光束的功率密度可以表示为空间分布  $I_0(r)$  和无量纲时间波形  $B(t)$  的乘积,典型的波形  $B(t)$  有阶梯波、矩形波、瞬时作用( $\delta$ 函数)三角波和梯形波、指数衰减波形、高斯波形和连续脉冲波形等。将  $I(r,t)=I_0(r) \cdot B(t)$  代入上述公式,即可得到相应的结果。

在实践中,光伏(PV)型半导体光电探测器远在材料熔融之前就已失效,这是由于光伏型探测器的损伤有两种形式:永久性破坏和暂时性破坏。永久性破坏指探测器受激光辐照,其p-n结温度达到熔点,p-n结退化为电阻且不可恢复;暂时性破坏指探测器受激光辐照,由于热效应引起探测器信号下

降,探测器灵敏度下降导致器件暂时失效,经过一段时间器件性能可以得到恢复。与永久性损伤相比,光伏型暂时性损伤所需的激光功率密度要小一些。详细讨论见文献[4,5]。

**结论** 利用热弹性理论建立了激光与半导体材料相互作用的模型。通过解析计算得到温升和应力场的瞬态分布。研究表明,InSb 材料的损伤阈值与辐照时间和光斑半径反向相关。在同一条件下,造成熔融损伤的阈值较热应力损伤阈值低,所以 InSb 的破坏形态为熔融破坏。通过对非线性参量的分析,得到在不考虑非线性效应时相对误差较大,因此在进行激光辐照效应计算和损伤阈值分析时,半导体材料的非线性效应应该加以考虑。结论和相关的实验结果在函数关系和数量级上取得一致,为激光对抗和激光防护技术提供了参考。

#### 参 考 文 献

- 1 Xia Jinjun, Gong Hui, Cheng Lei. CW laser induced thermal and mechanical damage in optical window materials. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(1): 20~23(in Chinese)
- 2 Amit Pratap Singh, Avinashi Kapoor, Tripathi K N *et al.*. Laser damage studies of silicon surfaces using ultrashort laser pulses. *Opt. & Laser Technol.*, 2002, **34**(1): 37~43
- 3 Liu X, Du D, Mourou G. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **33**(10): 1706~1716
- 4 Chen Jinbao, Lu Qisheng, Zhong Hairong *et al.*. Damage threshold of CW COIL to InSb (PV) detector. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1998, **10**(2): 221~224 (in Chinese)
- 5 Cheng Xiang' ai, Lu Qisheng, Ma Liqin *et al.*. Experimental study of HgCdTe(PV) detector irradiated by CW 1.319  $\mu\text{m}$  laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(5): 622~626 (in Chinese)
- 6 Prael S A. Charts to rapidly estimate temperature following laser irradiation. *Proc. SPIE*, 1995, **2391**: 499~511
- 7 Qiang Xiwen, Zhang Jianquan, Liu Feng *et al.*. Thermal stress damage of semiconductors induced by laser beam. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2000, **27**(8): 709~713 (in Chinese)
- 8 Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Cheng Xiang' ai *et al.*. Spot size effect of CW laser induced damage threshold in optical materials. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9): 1055~1058 (in Chinese)
- 9 Özisik M N. *Heat Conduction* (热传导). Yu Changming transl. Beijing: High Education Press, 1983. 596~615 (in Chinese)
- 10 Wang Honggang. *Thermal-Elastic Mechanics* (热弹性力学概论). Beijing: Tsinghua University Press, 1989(in Chinese)
- 11 Duan Xiaofeng, Niu Yanxiong, Zhang Chu *et al.*. Numerical analysis of the temperature field in HgCdTe detector by laser irradiation. *J. Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2003, **14**(2): 191~193 (in Chinese)
- 12 Kuanr A V, Bansal S K, Srivastava G P. Laser-induced damage in InSb at 1.06  $\mu\text{m}$  wavelength — a comparative study with Ge, Si, and GaAs. *Opt. & Laser Technol.*, 1996, **28**(5): 345~353
- 13 Wei Guanghui, Yan Peigen. *Apply of Laser Technology in Ordnance Industry* (激光技术在兵器工业中的应用). Beijing: Ordnance Industry Press, 1995. 145~150 (in Chinese)